



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 44 37 933 A 1**

⑤ Int. Cl.⁶:
B 24 C 3/00
B 08 B 5/02
B 05 B 7/04
B 23 K 1/20
H 05 K 3/26

⑳ Aktenzeichen: P 44 37 933.1
㉑ Anmeldetag: 24. 10. 94
㉒ Offenlegungstag: 11. 5. 95

DE 44 37 933 A 1

③① Unionspriorität: ③② ③③ ③①
08.11.93 US 148233

⑦① Anmelder:
Ford Motor Corp., Dearborn, Mich., US

⑦④ Vertreter:
Bonsmann, M., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 41063
Mönchengladbach

⑦② Erfinder:
Goenka, Lakhi Nandlal, Ann Arbor, Mich., US

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zum Reinigen eines Werkstückes mit abrasivem CO₂-Schnee

⑤⑦ Zum Umwandeln von flüssigem CO₂ in CO₂-Schnee wird flüssiges CO₂ durch eine in einer CO₂-Düse vorgesehene Öffnung geleitet. Die Düse ist innerhalb eines langgestreckten Hohlraums eines Körpers angeordnet, der seinerseits mit einer zum Leiten des CO₂-Schnees in Richtung auf ein Werkstück vorgesehenen Strahldüse in Verbindung steht. Zur Mischung von Umgebungstemperatur aufweisender Druckluft mit flüssigem Stickstoff zwecks Vorkühlens der Druckluft und anschließendes Leiten der sich ergebenden Mischung auf einen an die Austrittsöffnung der Strahldüse angrenzenden Bereich ist eine Mischeinrichtung vorgesehen. Infolge der Vorkühlung der Druckluft wird der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von flüssigem CO₂ in CO₂-Schnee erhöht. Die Strahldüse kann in einem überexpandierten Modus betrieben werden, wodurch die Stoßwelle innerhalb dieser gehalten und die Geräuschbildung reduziert wird.

DE 44 37 933 A 1

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Erzeugen von abrasivem CO₂-Schnee, mittels derer bzw. bei dem CO₂-Schnee auf eine von einem Werkstück zu entfernende, Verunreinigungen aufweisende Fläche geleitet wird und bei deren bzw. dessen Einsatz Überschallgeschwindigkeiten auftreten, wobei die dabei auftretende Geräuschbildung reduziert wird.

Die Verwendung von flüssigem Kohlendioxid zum Erzeugen und anschließenden Beschleunigen von CO₂-Schnee auf hohe Geschwindigkeiten zwecks Entfernen von Partikeln aus einem Substrat ist aus der US-Patentschrift 4 962 891 (Layden) bekannt. Zur Erzeugung eines Gemisches aus Gas und CO₂-Schnee durch adiabatische Expansion wird eine gesättigte CO₂-Flüssigkeit mit einer Entropie unter 135 BTU pro Pfund durch eine Düse geleitet. Um möglichst große Tröpfchen aus flüssigem CO₂, die dann durch adiabatische Expansion in festen CO₂-Schnee umgewandelt werden, zu erhalten, sind eine Reihe von Kammern und Platten vorgesehen. Die Wände der Strahldüse sind unter einem Winkel von weniger als 15° in geeigneter Weise derart kegelförmig ausgebildet, daß die Stärke oder die Bündelung des Stroms aus festem/gasförmigem CO₂ nicht unter das zum Reinigen des Werkstücks Notwendige herabgesetzt wird. Bei der Düse, die aus geschmolzener Kieselerde oder Quarz hergestellt sein kann, ist keinerlei Vorkühlung vorgesehen.

Aus der US-Patentschrift 5 018 667 (Lloyd), Spalten 5 und 7, ist die Verwendung von Mehrfachdüsen und kegeligen konzentrischen Austrittsöffnungen zum Steuern der Strömung der Mischung aus CO₂ und Schnee bekannt. Dabei wird eine Dispersion des Schnees anstatt einer Bündelung desselben nach seinem Austritt aus der Düse angestrebt. In Spalte 6, Zeilen 33 bis 65, lehrt Lloyd, eine geringe Menge von flüssigem CO₂ zwecks Erzielung eines blitzartigen Überganges des CO₂ vom flüssigen in den festen Zustand, was mit einem beträchtlichen Temperaturabfall verbunden ist, durch eine Pilotdüse und dann in eine Expansionskammer zu leiten. Dieses gekühlte Gemisch aus Feststoffen, Flüssigkeit und Gas kühlt die Innenseite der Düse, was dann eine Kühlung des übrigen Teils der Düse durch Leitung zur Folge hat. Diese Kühlung wirkt als konstante Wärmeaufnahmeeinrichtung, durch die das flüssige CO₂ bei Eintritt in die Primäröffnungen des Körpers vorgekühlt wird. Dadurch wird wiederum die Umwandlung der durch die Primäröffnungen der Düse fließenden Hauptströmung des flüssigem CO₂ verbessert. Dabei werden keinerlei vorkühlende Gase in der Nähe der Düse zur Verbesserung der blitzartigen Umwandlung der Flüssigkeit in die feste Phase verwendet.

Aus den US-Patentschriften 4 631 250 und 4 747 421 (Hayashi) ist die Verwendung von verflüssigtem Stickstoff (N₂) zum Kühlen einer einen abgedichteten Hohlraum bildenden mantelartigen Umfangswand während des Einleiten eines Stroms aus CO₂-Gas unter Druck in den Hohlraum bekannt. Die durch die gekühlten Umfangswände hervorgerufene Kühlung bewirkt in der Kammer eine Umwandlung des CO₂ in Schnee. Zum Durchwirbeln und Abführen des CO₂ mit hohen Geschwindigkeiten aus der Kammer durch eine Strahldüse wird N₂-Gas unter hohem Druck in die Kammer geleitet. Während flüssiges N₂ zum Kühlen der Umfangswände eingesetzt wird, wird das atmosphärische N₂ nur zum Durchwirbeln und Fördern des CO₂-Schnees aus

dem gekühlten Hohlraum verwendet.

Im Gegensatz zu diesem Stand der Technik setzt die vorliegende Erfindung preiswerte Bauteile sowie ohne weiteres verfügbare Niederdruckluft zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Erzeugung von CO₂-Schnee und zur Verbesserung der Koagulation von CO₂-Schnee in größere CO₂-Schneepartikel ein. Zum Bündeln des CO₂-Schnees auf das Werkstück wirkt eine im überexpandierten Modus betriebene Überschalldüse. Gleichzeitig wird das durch die Druckgase erzeugte Schergeräusch herabgesetzt.

In einer Vorrichtung zum Reinigen eines Werkstücks mit abrasivem CO₂-Schnee ist eine Düse zum Aufnehmen und Ausstoßen von flüssigem CO₂ durch eine Öffnung vorgesehen, die so bemessen ist, daß sie das flüssige CO₂ in CO₂-Schnee umwandelt. Ein in sich einen langgestreckten Hohlraum umschließender Körper ist so an die Düse angeschlossen, daß der CO₂-Schnee in den Hohlraum hineingeschleudert wird. Um die Stoßwelle zwecks Herabsetzens des von ihr ausgehenden Schergeräusches innerhalb der Düse zu halten, wird sie in einem überexpandierten Modus betrieben. An den Hohlraum des Körpers schließt sich eine Strahldüse an, mittels derer der unter Druck stehende CO₂-Schnee auf das Werkstück gerichtet wird. Damit der CO₂-Schnee unter Druck ausströmen kann, wird in dem langgestreckten Hohlraum Druckluft zugeführt.

Weitere Aufgaben, Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung der in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiele. Es zeigen:

Fig. 1 eine Darstellung eines erfindungsgemäßen CO₂-Reinigungssystems bei dessen Einwirkung auf ein als Leiterplatte ausgebildetes Werkstück;

Fig. 2 einen Querschnitt einer ersten bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen CO₂-Generatordüse;

Fig. 3 eine perspektivische Darstellung einer ersten bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Strahldüse, wobei die Formen der Innenabmessungen der Düse durch verdeckte Linien und weggeschnittene Bereiche dargestellt sind;

Fig. 4 ein Enthalpiediagramm mit einer Darstellung des Überganges oder der blitzartigen Umwandlung des flüssigen CO₂ in Schnee gemäß der Arbeitsweise des Verfahrens der vorliegenden Erfindung;

Fig. 5 einen Schnitt durch eine verbesserte CO₂-Schneegeneratordüse mit mehreren Flügeln;

Fig. 6 einen Schnitt durch einen der Flügel längs der Schnittlinie 6-6 in Fig. 5;

Fig. 7 eine perspektivische Darstellung der den CO₂-Schnee erzeugenden Düse und der in Fig. 5 gezeigten über den Umfang verteilt angeordneten Flügel;

Fig. 8 einen Schnitt durch den Überschallabschnitt einer verbesserten Strahldüse;

Fig. 9 eine Darstellung des Luftdrucks in dem verbesserten Überschallabschnitt der Strahlgasdüse von Fig. 8;

Fig. 10 eine von oben gesehene Schnittdarstellung des Überschallabschnittes der verbesserten Strahlgasdüse;

Fig. 11, 12, 13 und 14 Schnittansichten des Überschallabschnittes der verbesserten Strahlstrahlgasdüse längs der Schnittlinien in Fig. 10.

In Fig. 1 ist ein erfindungsgemäßes CO₂-Reinigungssystem schematisch dargestellt. Ein CO₂-Schneegenerator 10 ist mit einem Vorrat 20 an flüssigem CO₂, einer Quelle 30 mit Druckluft und einer Quelle 40 mit flüssi-

gem Stickstoff N_2 verbunden. Der feste CO_2 -Schnee, der aus der Strahldüse des CO_2 -Generators 10 austritt wird, wird auf ein schematisch dargestelltes und als Leiterplatte mit darauf angebrachten elektronischen Bauteilen ausgebildetes Werkstück 90 gebündelt. Die Abmessungen des Werkstücks sind aus Gründen der Klarheit vergrößert dargestellt und stellen nicht notwendigerweise die Größe des CO_2 -Abdruckes auf der Leiterplatte dar.

Der Vorrat 20 an flüssigem CO_2 wird bei annähernd $-20^\circ C$ gespeichert und unter einem Druck von annähernd $2070 \cdot 10^3$ Pa bis $2760 \cdot 10^3$ Pa über eine Leitung 24 durch ein Steuerventil 22 und dann in den CO_2 -Schneegenerator 10 gepumpt. Das Steuerventil 22 regelt den Druck und die Strömungsgeschwindigkeit, mit der das flüssige CO_2 in den CO_2 -Schneegenerator 10 geführt wird, der seinerseits die Menge des Schnees am Ausgang regelt.

Die "Betriebsluft"-Quelle 30 enthält im allgemeinen einen Luftverdichter und -vorrat der üblicherweise in einer Herstellungs- oder Produktionsumgebung gängigen Bauart. Der Luftverdichter kann ein großes Luftvolumen, im typischen Fall 200 cfm bei Raumtemperatur, über eine Versorgungsleitung 34 pumpen. In dieser Versorgungsleitung liegt zum Regeln des Druckes und der Strömungsgeschwindigkeit der vom Betriebsluftvorrat 30 kommenden Luft ein Steuerventil 32. Die Verwendung vorhandener Betriebsluft im Druckbereich von $350 \cdot 10^3$ Pa bis $700 \cdot 10^3$ Pa senkt die Anfangskapitalkosten des vorliegenden Systems beträchtlich.

Ein Vorrat 40 an flüssigem Stickstoff (N_2) ist über eine Versorgungsleitung 44 an einen Mischer 50 angeschlossen. Dieser erlaubt das Einspritzen des flüssigen Stickstoffs in die Betriebsluftströmung nach den Anforderungen für einen zweckmäßigen Betrieb des Systems. Zum Steuern des Druckes und des Volumens des flüssigen Stickstoffs ist ein Steuerventil 42 in die Versorgungsleitung 44 für den flüssigen Stickstoff eingeschaltet. Der Stickstoff mischt sich in dem Mischer 50 mit der Betriebsluft und kühlt diese. Wie in Fig. 2 dargestellt, kann der Mischer 50 durch bloßes Einsetzen der den flüssigen Stickstofffördernden Leitung 44 in die Leitung 34 gebildet werden, welche die Betriebsluft aus dem Vorrat 30 in die insgesamt mit 60 bezeichnete CO_2 -Schneegeneratordüse fördert.

Wie weiterhin aus Fig. 2 ersichtlich, weist die CO_2 -Schneegeneratordüse 60 einen Körper 62 mit einer im wesentlichen zylinderförmigen Gestalt auf. Dieser Körper umschließt einen Körperhohlraum 64 mit einem Durchmesser von annähernd 25 bis 100 mm, wobei ein Durchmesser von 32 mm bei der bevorzugten Ausführungsform, bei der der CO_2 -Schnee erzeugt wird, verwendet wird. Der Hohlraum 64 ist mindestens zehn bis fünfzehn Durchmesser lang. Dies führt zu einem für das Koagulieren von CO_2 -Schneepartikeln zum Ausbilden größerer CO_2 -Partikel ausreichend beschränkten Volumen.

Die das flüssige CO_2 vom Vorrat 20 fördernde Leitung 24 durchfaßt das geschlossene Ende des Körpers 62 und erstreckt sich über annähernd 100 mm in den Körperhohlraum 64. Der Körper 62 ist gegenüber der Leitung 24 abgedichtet wodurch die Ausbildung eines Druckes im Körperhohlraum 64 ermöglicht wird. An das Ende der das flüssige CO_2 fördernden Leitung 24 schließt sich eine Einspritzdüse 70 an. Über den Umfang verteilt und am Ende der Einspritzdüse 70 sind mehrere Öffnungen 72 angeordnet. Während der Innendurchmesser der Einspritzdüse 70 annähernd 12,5 mm be-

trägt, haben die Öffnungen 72 einen Durchmesser von nur 1,02 mm. Die Öffnungen sind als in die Düse 70 eintretende Bohrungen oder Kanäle, die mit deren Längsachse und der des Hohlraumes 64 einen Winkel einschließen, ausgebildet, so daß der Schnee beim Herauspressen des flüssigen CO_2 durch die Öffnungen 72 mit einer gewissen vorwärts gerichteten Geschwindigkeit in Richtung auf den langgestreckten Abschnitt des Hohlraumes 64 geleitet wird. Der genaue Winkel, unter dem das CO_2 durch die Öffnungen 72 ausgestoßen wird, hängt von der Konstruktion ab, liegt aber bei der bevorzugten Ausführungsform zwischen annähernd 30° und 60° .

Unter weiterer Bezugnahme auf Fig. 2 sei ausgeführt, daß die Betriebsluftleitung 34 vom Mischer 50 an einer Stelle zwischen dem geschlossenen Ende des Körpers 62 und den Öffnungen 72 der Einspritzdüse 70 in dem Körper 62 der CO_2 -Schneegeneratordüse 60 mündet. Der Winkel, unter dem die Leitung 34 in den Körper 62 eintritt, verleiht der Betriebsluft bei deren Eintritt unter Druck in den Hohlraum 64 nicht nur ein Vorwärtsmoment, sondern die Einbaustelle und der Winkel der Leitung 34 gegenüber dem Körper 62 bewirken auch, daß die Betriebsluft in Richtung auf die Einspritzdüse 70 gelenkt wird. Der Innendurchmesser der Betriebsluftleitung 34 beträgt annähernd 32 mm, was bei der bevorzugten Ausführungsform zu einem geeigneten Volumen an Betriebsluft führt, um eine Bewegung des CO_2 -Schnees mit zweckmäßiger Geschwindigkeit zu erreichen.

Das Betriebsverfahren des CO_2 -Schneegenerators 10 wird nun unter weiterem Bezug auf Fig. 2 erläutert. Das flüssige CO_2 wird unter einem von dem Steuerventil 22 gesteuerten Druck aus dem Vorrat 20 durch die Versorgungsleitung 24 gepumpt. Das flüssige CO_2 wird durch die in der Einspritzdüse 70 vorgesehenen Öffnungen 72 unter Druck herausgepreßt und dadurch "blitzartig" aus dem flüssigen Zustand in einen Zustand überführt, der eine feste, hier allgemein CO_2 -Schnee genannte Form von CO_2 enthält. Abhängig von den Verhältnissen von Temperatur und Druck, wie in dem Enthalpiediagramm von Fig. 4 dargestellt, wird der CO_2 -Schnee nun entweder mit flüssigem CO_2 oder CO_2 in Gasform gemischt. Bei der bevorzugten Betriebsweise hat das flüssige CO_2 eine Temperatur von annähernd $-20^\circ C$ und wird durch die Öffnungen 72 in der Einspritzdüse 70 unter einem Druck von annähernd $2070 \cdot 10^3$ Pa gepumpt. Diese Zusammenstellung von Charakteristika ist in dem Enthalpiediagramm von Fig. 4 mit Punkt 1 bezeichnet. Bei dem Austritt des flüssigen CO_2 aus den Öffnungen 72 geht dies auf Punkt 2A des Enthalpiediagramms über. Fachleute verstehen, daß der Punkt 2A in denjenigen Bereich verschoben werden kann, in dem sich das austretende CO_2 durch Erhöhung des Druckunterschiedes zwischen dem Druck des flüssigen CO_2 in der Düse 70 und des Gasdruckes in dem Hohlraum 64 und auch durch Verringerung der Temperatur des Gases in dem Hohlraum 64 in der Fest- und Gasphase befindet.

Beides kann entweder durch Steuern des Druckes der durch die Leitung 34 fließenden Betriebsluft oder durch Einspritzen eines gesteuerten Volumens von flüssigem Stickstoff durch den Mischer 50 in die Betriebsluft zwecks sorgfältiger Steuerung der sich einstellenden Temperatur des Gasgemisches oder durch beides erreicht werden. Unter der Annahme, daß flüssiger Stickstoff mit einer Temperatur von $-268^\circ C$ in den Mischer 50 in einem Verhältnis von 15 Teilen gasförmigen Stickstoffs zu 85 Teilen Luft eingespritzt wird, kann die Be-

triebsluft bei einem Druck von $550 \cdot 10^3$ Pa auf eine Temperatur im Bereich von -40°C bis -85°C vorgekühlt werden. Wenn dieses vorgekühlte Gemisch aus Betriebsluft und Stickstoff der Düse 70 zugeführt wird, bewegt sich der Punkt 2B auf dem Enthalpiediagramm in Fig. 4 zum Punkt 2C, was eine Erzeugung einer vergrößerten Menge von Schnee und eine verringerte Menge von flüssigem CO_2 zur Folge hat.

Das durch die Leitung 34 vom Mischer 50 strömende vorgekühlte Gemisch aus Luft und Stickstoff kühlt auch die Einspritzdüse 70, was eine Abführung der latenten Wärme, die beim blitzartigen Durchtritt des flüssigen CO_2 durch die Öffnungen 72 in der Einspritzdüse erzeugt wird, zur Folge hat. Diese Kühlwirkung verbessert auch den Wirkungsgrad der Umwandlung des flüssigen CO_2 in Schnee. Die Umwandlung eines Teiles des in den Hohlraum 64 eingespritzten flüssigen CO_2 aus dem flüssigen Zustand in den gasförmigen Zustand führt auch zu einem höheren Druck der Betriebsluft in dem Körperhohlraum 64. Dadurch werden Systemdruckverluste ausgeglichen und der Druck am Einlaß der Strahldüse 100 um bis zu annähernd 20% erhöht, wodurch die Düsenaustrittsgeschwindigkeiten erhöht und damit der Reinigungswirkungsgrad des Verfahrens verbessert werden.

Unter weiterer Bezugnahme auf Fig. 2 sei ausgeführt, daß das Gemisch aus CO_2 -Schnee und Gas aus den Öffnungen 72 in der Einspritzdüse 70 in Richtung auf das langgestreckte Ende 66 des Körperhohlraumes 64 ausgestoßen wird. Die Strahldüse 100 bewirkt ein isentropisches Expandieren der Strömung in den Umgebungsdruck. Während dieses Vorganges erfolgt eine Umwandlung von jeglichem noch vorhandenen flüssigem CO_2 in CO_2 -Schnee. Entsprechend der Darstellung in Fig. 3 weist die Strahldüse 100 einen allgemein zylinderförmigen Abschnitt 110 mit einer zum Anschluß an den Körper 62 der CO_2 -Schneegeneratordüse 70 geeigneten Bemessung auf. Dieser Anschluß kann entweder unmittelbar oder unter Verwendung eines Schlauches 95 mit ausreichendem Durchmesser und ausreichender Länge erfolgen. Der zylinderförmige Abschnitt 110 hat einen Innendurchmesser von annähernd 23 mm und erstreckt sich konisch verjüngend über eine Länge von annähernd 150 mm bis zu einer Engstelle 120 mit einem etwa rechteckförmigen Querschnitt von annähernd 23 mm mal 2,5 mm. Dieser sich konisch verjüngend ausgebildete Bereich zwischen dem zylinderförmigen Abschnitt 110 und der Engstelle 120 bewirkt eine Druckabnahme des CO_2 -Schnees und der durchströmenden Gase. An die Engstelle 120 schließt sich ein expandierender, in einen vergrößerten Austrittsdüsenabschnitt 130 mündender Bereich mit einer rechteckförmigen Austrittsöffnung 132 an, durch die der CO_2 -Schnee und die Gase in Richtung auf das Werkstück ausströmen. Der zylinderförmige Abschnitt 110 der Strahldüse 100 ist aus Aluminium hergestellt und für eine Strömung und Führung von CO_2 -Gas und -Schnee mit Unterschallgeschwindigkeit ausgebildet. Die vergrößerte Austrittsdüse 130 ist für eine Überschallströmung von CO_2 -Gas und -Schnee aus der Austrittsöffnung 132 ausgebildet.

Bei der vorliegenden Ausführungsform der Erfindung hat das aus der Austrittsöffnung 132 der Strahldüse 100 austretende Gemisch aus Luft, Kohlenstoffdioxidgas und -schnee eine Temperatur von annähernd -100°C und eine Geschwindigkeit von annähernd 520 m pro Sekunde. Das austretende Gemisch besteht zu annähernd 10 Masse-% aus festem CO_2 -Schnee mit einer mittleren Partikelgröße von annähernd 100 Mikrome-

tern. Die Strahldüse 100 wurde für einen Einlaßdruck von annähernd $690 \cdot 10^3$ Pa entworfen und erzeugt eine Austrittsströmung mit einer Machzahl von annähernd 1,92. Der CO_2 -Schnee tritt mit einer Geschwindigkeit von annähernd 185 m pro Sekunde mit im wesentlichen gleichförmiger Verteilung aus. Die Austrittsöffnung 132 befindet sich in einem Abstand von 50 bis 150 mm vom Werkstück 90. Die Strahlgase und der aus der Austrittsöffnung 132 austretende Schnee strömen im wesentlichen parallel zu der Längsachse der Düse 100 und divergieren nur unwesentlich. Während die Partikelgröße des aus der Düse 70 austretenden CO_2 -Schnees als Ergebnis des Koagulations- und Agglomerationsprozesses in dem langgestreckten Hohlraum 64 nur etwa 0,0127 bis 0,025 mm beträgt, beträgt die Größe der aus der Strahldüse 100 austretenden CO_2 -Partikel annähernd 0,10 bis 0,15 mm. Der Auftreffwinkel des Schnees auf das Werkstück 90 kann zwischen 0° und 90° schwanken, wobei ein Auftreffwinkel von annähernd 30° bis 60° in den meisten Fällen am günstigsten ist.

Nachfolgend wird das Arbeitsverfahren der vorstehend beschriebenen Ausführungsform des CO_2 -Reinigungssystems erläutert. Unter der Annahme eines Betriebsluftdruckes von annähernd $585 \cdot 10^3$ Pa und einer Umgebungstemperatur von annähernd 24°C wird die Wirkung der Steuerung von Druck und Temperatur des Gasgemisches aus Luft und flüssigem N_2 in dem Mischer 50 unter Bezugnahme auf Fig. 4 erläutert. Punkt 1 in Fig. 4 stellt den Zustand des gesättigten flüssigen CO_2 in der Düse 70 dar, die durch den Regler 22 auf einen Druck von $2070 \cdot 10^3$ Pa und eine Temperatur von annähernd -18°C geregelt wird. Der Punkt 2A stellt einen Druck von $689 \cdot 10^3$ Pa dar und zeigt den Zustand des CO_2 nach dem blitzartigen Austritt aus den Öffnungen 72 der Einspritzdüse 70. Das aus der Düse 70 ausströmende CO_2 tritt in sowohl flüssiger als auch gasförmiger Phase mit einer Temperatur von annähernd -40°C aus. Falls der Druck der Betriebsluft im Hohlraum 64 auf annähernd $415 \cdot 10^3$ Pa anstelle von $690 \cdot 10^3$ Pa am Punkt 2B eingestellt wird, stellt das sich ergebende, aus der Düse 70 austretende CO_2 eine Kombination aus Feststoffen und Dampf dar, und die Temperatur der sich ergebenden Kombination wird annähernd -62°C betragen. Die Relativanteile von flüssigem und gasförmigem CO_2 können daher durch Einstellen des Druckes der Luft im Hohlraum 64 gesteuert werden. Falls das aus dem Mischer 50 austretende Gemisch aus Luft und Stickstoff auf einer Temperatur von annähernd -45°C gehalten wird, würde dies das aus der Einspritzdüse 70 austretende CO_2 -Gemisch kühlen, so daß das sich ergebende Gemisch dem Punkt 2C in Fig. 4 entsprechen würde, der einem Gemisch aus CO_2 in fester und in flüssiger Phase entspricht. Die Zusammensetzung des CO_2 -Gemisches im Hohlraum 64 läßt sich dann durch Einstellen des Drucks oder der Temperatur der Luft im Hohlraum 64 oder durch Einstellen von beidem einstellen. Die langgestreckte Form des Hohlraums 64 führt auch zu einer ausreichenden Länge für die Koagulation des CO_2 -Schnees in größere Partikel vor dem Eintreten in die Strahldüse 100.

Während des Einspritzens des flüssigen CO_2 durch die Einspritzdüse in den Hohlraum 64 tritt wegen der teilweisen Umwandlung des flüssigen CO_2 in Dampf im Hohlraum ein Druckanstieg bis auf $105 \cdot 10^3$ Pa auf. Dieser Druckanstieg führt zu einer Geschwindigkeitserhöhung der aus der Düse 100 austretenden Partikel um etwa 10%, wodurch der Wirkungsgrad des Reinigungsvorganges weiter verbessert wird.

Der Einlaßdruck am zylinderförmigen Abschnitt 110 der Strahldüse 100 kann zwischen 275 und 2070 · 10³ Pa variiert werden. Der Druck bei der bevorzugten Ausführungsform liegt aber bei einer Temperatur zwischen -40°C und -75°C bei 415 · 10³ Pa bis 690 · 10³ Pa. Der Druck an der Austrittsöffnung 132 der Strahldüse 130 ist so bemessen, daß er aufatmosphärischem Druck liegt, während die Austrittstemperatur bei annähernd -130°C liegt. Der Prozentsatz von festem zu gasförmigem, aus der Strahldüse 100 austretendem CO₂ liegt bei etwa 10 bis 40%.

Der mit dieser Ausführungsform der vorliegenden Erfindung erzeugte CO₂-Schnee wurde auf eine mit Kolophonium ausgehärtete Koki-Palette (koki rosin baked pallet) von 203 mal 355 mm der bei Fließblötungen verwendeten Bauart gerichtet. Die Palette hatte einen Überzug von getrocknetem Koki-Rosin-Flux mit einer Stärke von annähernd 0,13 mm und war während ihrer Herstellung zahlreichen Fließblötzyklen unterworfen worden. Bei einem Betriebsluftdruck von 586 · 10³ Pa wurde der Koki-Rosin-Flux in etwa dreißig Sekunden vollständig von der Palette entfernt, während der angesammelte Flux mit handelsüblichen CO₂-Reinigungssystemen nicht entfernt werden konnte. In ähnlicher Weise wurde eine Fläche von 75 mm mal 75 mm einer FR4-Leiterplatte von der bei einer Drehzahlmesseranordnung verwendeten Bauart mit einer Kombination aus Fluxen (einschließlich Koki) bis zu einer Tiefe von annähernd 0,076 mm unter Einsatz der vorliegenden Erfindung in annähernd fünf bis zehn Sekunden gereinigt. Schließlich wurde eine Klebstoffplatte von 203 mm mal 254 mm der bei elektronischen Herstellungsverfahren verwendeten Bauart mit annähernd 1,27 mm Rosin-Leim überzogen und dann in annähernd einhundertzwanzig Sekunden unter Einsatz der vorliegenden Erfindung gereinigt. Dieses Resultat führt mindestens zu dem gleichen Ergebnis und ist teilweise sogar besser als die Reinigungswirkung allgemein erhältlicher und verdichtete CO₂-Pellets verwendender Systeme.

Eine verbesserte Ausführungsform der CO₂-Schnee erzeugenden Düse trägt die Bezugsziffer 170 und ist in den Fig. 5 und 6 zur Verwendung in Verbindung mit dem oben beschriebenen Betriebsluftsystem oder in Systemen dargestellt, bei denen Luftdrücke von 690 bis 2070 · 10³ Pa zur Erhöhung der Geschwindigkeit des CO₂-Schnees benötigt werden. Die CO₂ erzeugende Düse 170 enthält sechs symmetrisch um den Umfang des Düsenkörpers 174 angeordnete Flügel oder Tragflächen 180. Jeder Flügel 180 ist annähernd 30 mm lang und nimmt von 25 mm im Nabenbereich 185 auf 20,3 mm an der Spitze 187 ab. Jeder Flügel 180 ist unter einem Winkel von annähernd 10° bis 14° zu der Richtung der Strömung der Luft entlang der Düse ausgerichtet, wobei 12° das für die bevorzugte Ausführungsform gewählte Optimum ist. Diese 12°-Schräge im relativen Angriffswinkel der Flügel 180 gegenüber dem relativen Wind verleiht der vorbeiströmenden Luft eine Wirbelbewegung oder Turbulenz. Die Zentralachse dieses Wirbels liegt im allgemeinen zentrisch zu der Zentralachse der Düse.

Dieser Angriffswinkel des Flügels gegenüber der relativen Luftströmung hat weiterhin eine Spitzenwirbelturbulenz an der Spitze 187 des Flügels 180 zur Folge. Dieser Spitzenwirbel erreicht bei einem Winkel von 12° sein Maximum, tritt aber auch bei anderen Winkeln im angegebenen Bereich auf. Die Kombination aus der Wirbelturbulenz und der durch die Flügel 180 bewirkten zufallsverteilten Turbulenz verbessert die Mischwir-

kung des CO₂-Schnees strömungsunterhalb der Flügel und vergrößert damit die Koagulation der Schneeflocken erheblich. Kleinerer CO₂-Schnee mit relativen Größen im Bereich von 0,0005 mills bis 0,001 mills koaguliert zu größeren Schneepartikeln mit relativen Größen im Bereich von 0,005 mills bis 0,015 mills.

Während der Querschnitt jedes Flügels 180 gemäß Fig. 6 im Hinblick auf eine einfache Herstellung um seine zentrale Achse symmetrisch ist, könnte der Querschnitt zum Zwecke einer Vergrößerung der Wirbelschleppen und der Wirbelturbulenzwirkungen auch gewölbt und unsymmetrisch ausgebildet sein. Sowohl die Flügel 180 als auch der Düsenkörper 174 sind aus bearbeitetem Aluminium hergestellt. Jeder Flügel 180 ist annähernd 5,1 mm stark und weist einen zentralen Durchgang 189 mit einer Stärke von annähernd 2,03 mm auf, der sich an einen Innenhohlraum 176 anschließt, der seinerseits an die Leitung 24 für flüssiges CO₂ angeschlossen ist. Mehrere Öffnungen 182, jede mit einem Durchmesser von annähernd 1,02 mm, erstrecken sich durch den Flügel 180, wobei sie von dem zentralen Durchgang 189 bis zu der strömungsabwärtigen Kante des Flügels führen und gegenüber der zentralen Achse der Düse 170 um 30° bzw. 45° abgeschrägt verlaufen. Diese achsenversetzte Richtung gibt dem ausgestoßenen CO₂ Antriebskomponenten sowohl längs als auch quer zu der Richtung der Strömung in Richtung auf die Schubdüse 130, was die Mischwirkung vergrößert. Durch Begünstigen eines chaotischen Mischens kollidieren CO₂-Schneeflocken miteinander und koagulieren so, daß auch größere Schneepartikel gebildet werden. Gemäß der Darstellung in Fig. 5 machen die größeren Abmessungen der Düse 170 eine Vergrößerung der Abmessungen der Körper 62 und des langgestreckten Körperhohlraums 64 zur Aufnahme der Düse 170 erforderlich, wobei ein Verhältnis von Länge zu Durchmesser von mindestens 15 aufrecht erhalten bleibt.

Diese Vergrößerung der CO₂-Partikel führt aufgrund der erhöhten Geschwindigkeit und der vergrößerten Masse der sich ergebenden Schneepartikel zu einer verbesserten Reinigungswirkung. Dieser verbesserte Reinigungswirkungsgrad kann für schnellere Reinigungen nützlich sein. In Fällen, in denen sich feine elektrische Bauteile in dem zu reinigenden Bereich befinden, kann dieser verbesserte Reinigungswirkungsgrad sich als ungeeignet erweisen. Die Wahl zwischen der ersten und der zweiten bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung hängt damit zum großen Teil von der Menge des während der Reinigung zu entfernenden Rückstandes, der für den Reinigungsvorgang verfügbaren Zeit und dem Vorhandensein von feinen Materialien oder empfindlichen Bauteilen in dem oder in der Nähe des zu reinigenden Bereiches ab.

Eine weitere Ausführungsform einer Strahldüsenkonstruktion mit herabgesetztem Geräuschpegel ist in Fig. 8 dargestellt. Eine Düse 200 weist einen Unterschallabschnitt 210 auf, der in seiner Form dem Abschnitt 110 der ersten bevorzugten Ausführungsform ähnlich ist, der aber in einer optimaleren Weise konisch verläuft. Das Ende des Unterschallabschnittes 210 ist zur Kupplung mit dem Abschnitt 66 des Körpers 62 des CO₂-Schneegenerators 60 ausgebildet. Der Unterschallabschnitt 210 weist eine Länge von 100 mm auf und schließt sich an eine Engstelle 220 mit im wesentlichen rechteckförmigem Querschnitt mit einer Höhe von annähernd 23 mm und einer Breite von 2,5 mm an. Bei dieser Konizität verringert sich die Querschnittsfläche des Übergangsbereiches gleichförmig und enthält in ih-

rem konischen Bereich keine plötzlichen Änderungen. Dieser konische Abschnitt zwischen dem zylinderförmigen Abschnitt 210 und der Engstelle 220, der in den Fig. 11, 12, 13 und 14 genauer dargestellt ist, führt zu einer Abnahme des Druckes und zu einer Geschwindigkeitserhöhung der Luft, des CO₂-Schnees und der durchströmenden Gase. An die Engstelle 220 schließt sich eine in einen vergrößerten Überschalldüsenabschnitt 230 übergehende Erweiterung mit einer rechteckförmigen Austrittsöffnung 232 an, durch die der CO₂-Schnee und die Gase in Richtung auf das Werkstück ausströmen.

Der Unterschallabschnitt 210 der Strahldüse 200 besteht aus Aluminium und ist so konstruiert, daß er einen Kanal für eine mit Unterschallgeschwindigkeit durch ihn hindurchtretende Strömung aus Luft, CO₂-Gas und -Schnee bildet. Der vergrößerte Überschalldüsenabschnitt 230 ist so ausgebildet, daß er die Überschallströmung aus Luft, CO₂-Gas und -Schnee aus der Austrittsöffnung 232 weiterleitet.

Die Kontur oder Krümmung der Innenoberfläche des Unterschallabschnittes 210 der Düse 200 ist gemäß dem von Thomas Morel in "Design of 2-D Wind Tunnel Contractions", Journal of Fluids Engineering, 1977, Band 99, beschriebenen angepaßten kubischen Konstruktionsverfahren konstruiert. Gemäß dieser Konstruktion strömen Luft und gasförmiges CO₂ bei ihrem Zusammenlaufen an der Engstelle 220 mit Unterschallgeschwindigkeiten von annähernd 18 bis 300 m/s bei Temperaturen von -50°C bis -85°C.

Die Kontur oder Krümmung der Innenoberflächen des Überschallabschnittes 230 ist mit einem Computerprogramm entsprechend den Erläuterungen von J.C. Sivells in der Abhandlung "A Computer Program for the Aerodynamic Design of Axisymmetric and Planar Nozzles for Supersonic and Hypersonic Wind Tunnels", AEDC-JR-78-63, erstellt. Diese Abhandlung kann von der US Air Force bezogen werden.

Die Kontur des vergrößerten Austrittsdüsenabschnittes 230 wird unter Bezug auf die nachfolgende Tabelle 1 wie folgt genauer beschrieben:

Koordinaten der überexpandierten Überschallkontur

x (mm)	y (mm)
0,00	11,48
6,45	11,48
22,63	11,51
37,52	11,71
54,94	12,55
77,19	16,13
98,20	24,56
122,58	33,53
166,80	46,58
239,73	61,01
279,65	66,04
319,05	69,47
371,75	72,16
421,28	73,13
448,08	73,25
457,20	73,28

Das von einer Strahldüse dieser Bauart erzeugte Geräusch wird an der Scherungsschicht zwischen der die Düse verlassenden Hochgeschwindigkeitsgasströmung

und der stationären, die Düse und das Werkstück umschließenden Umgebungsluft generiert. Die Lautstärke dieses Geräusches ist grob proportional zu der Düsenaustrittsgeschwindigkeit, erhoben zur fünften Potenz. Wenn die Düsenaustrittsgeschwindigkeit aus einer Überschalldüse das Zwei- oder Dreifache der Schallgeschwindigkeit beträgt, kann dieses Schergeräusch, gemessen in einem Abstand von 0,9 m von der Austrittsöffnung der Düse, in der Größenordnung von 120 Dezibel liegen. Die vorliegende Düse ist jedoch so entworfen, daß sie die normalerweise an oder außerhalb der Düsenöffnung vorhandene Stoßwelle an eine Stelle innerhalb der Düse verschiebt, so daß die Düse selbst das erzeugte Geräusch dämpft. Dies kann durch Einsatz einer überexpandierten Düsenkonstruktion erreicht werden.

Die Vorteile einer überexpandierten Düse lassen sich wie folgt erläutern. Überschalldüsen weisen im allgemeinen eine Kontur auf, die zu einer schmalen Engstelle zusammenläuft und dann an der Austrittsöffnung divergiert. Die Strömung in dem konvergierenden Abschnitt erfolgt mit Unterschallgeschwindigkeit, während die Strömung in dem divergierenden Abschnitt mit Überschallgeschwindigkeit erfolgt und die Strömung an der Engstelle Schallgeschwindigkeit hat. Die Expansion des Gases in einer gut konstruierten Überschalldüse ist im allgemeinen isentrop. Beim Entwurfsdruck (design pressure) ist der Druck am Düsenauslaß gleich dem Umgebungsdruck, und die Austrittsströmungsgeschwindigkeit erreicht die Entwurfsaustritts-Machzahl in der Düse. Falls der Düseneinlaßdruck ausreichend unter dem Entwurfsdruck liegt, wird eine normale Stoßwelle innerhalb der Düse und nicht an der Strahldüsenöffnung oder außerhalb der Düse erzeugt. Wenn die Strahldüse unter Bedingungen arbeitet, bei denen der Einlaßdüsendruck unter dem errechneten Wert liegt, arbeitet die Düse in einem "überexpandierten Modus". Die Strömungsexpansion strömungsoberhalb der Stoßwelle in der Strahldüse ist isentropisch, und die Strömungsgeschwindigkeit erreicht Überschallwerte.

Die Strömungsgeschwindigkeit sinkt jedoch bei einem gleichzeitigen scharfen Druckanstieg jenseits der Schockwelle auf Unterschallgeschwindigkeiten. Die Strömung verläßt die Strahldüse mit einer weit niedrigeren, unterhalb der Überschallgeschwindigkeit liegenden Geschwindigkeit. Dadurch wird das durch die Strahldüse erzeugte Schergeräusch beträchtlich herabgesetzt.

Gemäß diesem Konstruktionsvorhaben wurde der Unterschallabschnitt 210 der verbesserten Strahldüse 200 für einen Einlaßdruck von annähernd $5515 \cdot 10^3$ Pa entworfen. Dies würde bei diesem Einlaßdruck zu einer Austritts-Machzahl von annähernd 3,4 führen. Die Länge der Überschallkontur, das heißt die Länge vom Halsabschnitt 220 bis zur Austrittsöffnung 232 würde dann 457 mm betragen, so daß die Gesamtdüsenlänge 558 mm betragen würde. Die Austrittsöffnung 232 der Düse 200 hat eine Rechteckform mit Maßen von annähernd 147 mm mal 5 mm. Gemäß dieser Konstruktion kann die verbesserte Strahldüse 200 in einem überexpandierten Modus durch Halten des Einlaßdruckes im Vergleich zu dem Entwurfsdruck von $5515 \cdot 10^3$ Pa auf annähernd 655 bis $690 \cdot 10^3$ Pa betrieben werden. Unter diesen Umständen tritt die normale Stoßwelle 300 annähernd 75 mm innerhalb des Überschallabschnittes 230 und strömungsoberhalb der Austrittsöffnung 232 auf. Gemäß der Darstellung in Fig. 9 zeigen die entlang der Oberseite und der Seitenwände des Überschallabschnitt-

tes der Düse gemessenen relativen Druckmessungen an, daß der Relativdruck bei 1,0 am Düseneinlaß beginnt und mit einem verhältnismäßig steilen Gradienten auf annähernd 0,2 bei annähernd 178 mm vom Düseneinlaß und annähernd 0,05 bei 255 mm abnimmt. Der Relativdruck bleibt dann bis 510 bis 535 mm vom Hals allgemein konstant, was 75 bis 100 mm von der Austrittsöffnung 232 entspricht, zu welchem Zeitpunkt sich der Relativdruck scharf auf annähernd 0,2 erhöht. Dieser Druckanstieg entspricht dem Vorhandensein der Stoßwelle innerhalb der Düse.

Das durch die verbesserte Düsenkonstruktion erzeugte Geräusch wurde in einem Abstand von 0,9 m von der Düsenaustrittsöffnung mit annähernd 112 Dezibel gemessen, im Vergleich zu einem Geräusch, das von einer nicht im überexpandierten Modus betriebenen Düse erzeugt wurde und zu einem Geräuschpegel von annähernd 121 Dezibel führte. Dieser Unterschied stellt eine annähernd zehnfache Verminderung des durch die neue Düse erzeugten Geräusches dar, was von dem Betreiber der Einrichtung als eine wesentliche Herabsetzung des Geräuschpegels empfunden wird.

Die Stoßwelle innerhalb des Überschallbereichs 230 der Strahldüse 200 beeinflusst weder die Austrittsgeschwindigkeit noch die Reinigungswirkung der CO₂-Partikel aus zwei Gründen nicht nachteilig. Da erstens die von den Überschallgasen mitgenommenen CO₂-Partikel nicht die gleiche Geschwindigkeit wie die Gase erreichen, bewegen sich die CO₂-Partikel etwas langsamer. Wenn die Geschwindigkeit der Gase auf Unterschallpegel abfällt, verringert sich die Geschwindigkeit der CO₂-Partikel ebenfalls, aber aufgrund ihrer Masse um ein geringeres Maß. Zweitens würde sich die Geschwindigkeit der Austrittsgase ohnehin im Normalbetrieb in der Nähe des Druckaufbaus am Werkstück auf Unterschallgeschwindigkeit verringern, so daß der Reinigungswirkungsgrad des Systems infolge vorzeitiger Herabsetzung der Geschwindigkeit auf Unterschallgeschwindigkeit dann, wenn die Partikel von den austretenden Gasen mitgeführt werden, nicht wesentlich herabgesetzt wird.

Ein weiterer Vorteil eines Betriebs der Strahldüse 200 im überexpandierten Modus besteht darin, daß der durch das austretende Gas- und CO₂-Schnee-Gemisch erzeugte Abdruck breiter als ein entsprechender Abdruck ist, der bei einem Betrieb der Strahldüse bei dem Entwurfsdruck erzielt wird. Dieser größere Reinigungsabdruck ermöglicht das gleichzeitige Reinigen von größeren Bereichen des Werkstückes, ohne daß der Wirkungsgrad des Reinigungsverfahrens herabgesetzt wird.

Versuchsergebnisse einer Untersuchung der Reinigungsleistung der verbesserten Ausführungsform 200 der Strahldüse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Das aus der Austrittsöffnung 232 der Strahldüse austretende Gemisch aus Luft und Kohlenstoffdioxid weist eine Temperatur von annähernd -100°C und eine Geschwindigkeit von annähernd 90 m pro Sekunde auf. Das Ausgangsgemisch besteht auf die Masse bezogen zu annähernd 20% aus festem CO₂-Schnee mit einer mittleren Partikelgröße von annähernd 150 Mikrometern. Die Strahldüse 200 wurde für einen Einlaßdruck von annähernd 690 · 10³ Pa entworfen und erzeugt am Austritt eine Machzahl von annähernd 1,92. Der CO₂-Schnee tritt mit einer Geschwindigkeit von annähernd 210 m pro Sekunde mit einer allgemein gleichförmigen Verteilung aus. Die Austrittsöffnung 232 ist für einen Abstand von annähernd 50 mm vom Werkstück

90 konzipiert. Die aus der Austrittsöffnung 232 austretenden Gase und der austretende Schnee strömen im allgemeinen parallel zu der Längsachse der Düse 200 ohne wesentlich zu divergieren. Der Angriffswinkel des Schnees gegenüber dem Werkstück 90 kann zwischen 0° und 90° schwanken, wobei ein Angriffswinkel von annähernd 30° bis 60° für die meisten Betriebsarten am günstigsten ist.

Der mit diesem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung erzeugte CO₂-Schnee wurde auf eine Koki-Rosin-getrocknete Palette (203 mm mal 356 mm) der bei Fließlötanwendungen verwendeten Bauart gerichtet. Die Palette wies einen Überzug aus annähernd 0,127 mm starkem getrockneten Koki-Rosin-Flux auf und war während ihrer Herstellung zahlreichen Fließlötzyklen ausgesetzt gewesen. Bei einem Luftdruck von 586 · 10³ Pa wurde der Koki-Rosin-Flux in etwa zwanzig Sekunden vollständig von der Palette entfernt, während herkömmliche CO₂-Reinigungssysteme diesen angehäuften Flux nicht entfernen konnten. Auf ähnliche Weise wurde die 75 mm-mal-75 mm-Fläche einer FR4-Leiterplatte der bei einem Tachometer verwendeten Bauart, die mit einer Flux-Kombination (einschließlich Koki) bis zu einer Tiefe von annähernd 0,075 mm überzogen war, unter Verwendung der vorliegenden Erfindung in annähernd fünf bis zehn Sekunden gereinigt. Schließlich wurde eine 200 mm-mal-250 mm-Klebstoffplatte der bei einem elektronischen Herstellungsverfahren verwendeten Bauart, die mit annähernd 1,25 mm eines Rosin-Leims überzogen war, unter Verwendung der vorliegenden Erfindung in annähernd 120 Sekunden gereinigt. Dies zeigt, daß unter Einsatz der Erfindung der Reinigungsvorgang wesentlich schneller als bei CO₂ verwendenden herkömmlichen Systemen abläuft.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Reinigen eines Werkstückes mit abrasivem CO₂-Schnee, enthaltend in Kombination:

eine Düse (70) zum Aufnehmen und Ausstoßen von flüssigem CO₂ durch mindestens eine zum Umwandeln des flüssigen CO₂ in festen CO₂-Schnee ausgebildete Öffnung (72),

einen einen Hohlraum (64) aufweisenden Körper (62), in welchen die Düse (70) zwecks Ausstoßens des CO₂-Schnees in den Hohlraum (64) mündet, mit dem Körper (62) in Verbindung stehende Einrichtungen (30, 32, 34) zum Injizieren von Druckluft in den Hohlraum (64) zur Mitnahme des aus der Öffnung (72) der Düse (70) austretenden CO₂-Schnees, und

eine Strahldüse (100) mit einem mit dem Hohlraum (64) in Verbindung stehenden Unterschallabschnitt zur Aufnahme des CO₂-Schnees und der unter Druck stehenden Luft aus diesem, einer Engstelle (120) und einem Überschallabschnitt zum Leiten der Luft und des CO₂-Schnees in Richtung auf das Werkstück (90), wobei der Überschallabschnitt zum Zurückhalten der Stoßwelle innerhalb des Überschallabschnittes im überexpandierten Modus betrieben wird, wodurch das durch die aus der Düse austretende Druckluft und das durch den aus der Düse austretenden CO₂-Schnee erzeugte Geräusch herabgesetzt wird.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Überschallabschnitt der Strahldüse (100) so geformt ist, daß eine Verzögerung des

Luft- und CO₂-Schnee-Gemisches von Überschall- auf Unterschallgeschwindigkeiten vollständig in ihr erfolgt, so daß diese das Schallgeräusch in sich zurückhält.

3. Verfahren zum Reinigen eines Werkstücks mit abrasivem CO₂-Schnee, gekennzeichnet durch:

Aufnehmen von CO₂ in flüssiger Form bei einem ersten Druck und einer ersten Temperatur,

Durchleiten des flüssigen CO₂ durch eine Öffnung einer Düse zum Umwandeln des flüssigen CO₂ längs einer konstanten Entropielinie in ein Gemisch aus CO₂-Flüssigkeit und CO₂-Schnee,

Injizieren von Druckluft in einen an die Düse angrenzenden Hohlraum, so daß die Druckluft den CO₂-Schnee aufnimmt und sich mit diesem vermischt,

Zusammenführen des sich in dem Hohlraum bildenden CO₂-Schnees und der Druckluft und anschließendes Durchleiten des CO₂-Schnees mit Überschallgeschwindigkeit durch eine Strahldüse mit einer zum Lenken der aus dem Schnee bestehenden Strömung in Richtung auf das Werkstück ausgebildeten Kontur und

Herabsetzen der Luftgeschwindigkeit in dem Überschallabschnitt der Strahldüse auf Unterschallgeschwindigkeit, wodurch eine normale Stoßwelle innerhalb der Strahldüse erzeugt wird und Scherungsschichtgeräusche unterdrückt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß weiterhin einem an die Öffnung der Düse angrenzenden Düsenbereich ein Gemisch aus Betriebsdruckluft und N₂ zugeführt wird, wodurch infolge der blitzartigen Umwandlung des flüssigen CO₂ in Schnee auftretende latente Wärme abgeleitet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Luft innerhalb der Strahldüse ohne entscheidende Verlangsamung des CO₂-Schnees während dessen Austritts aus der Strahldüse von Überschall- auf Unterschallgeschwindigkeit verlangsamt wird.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

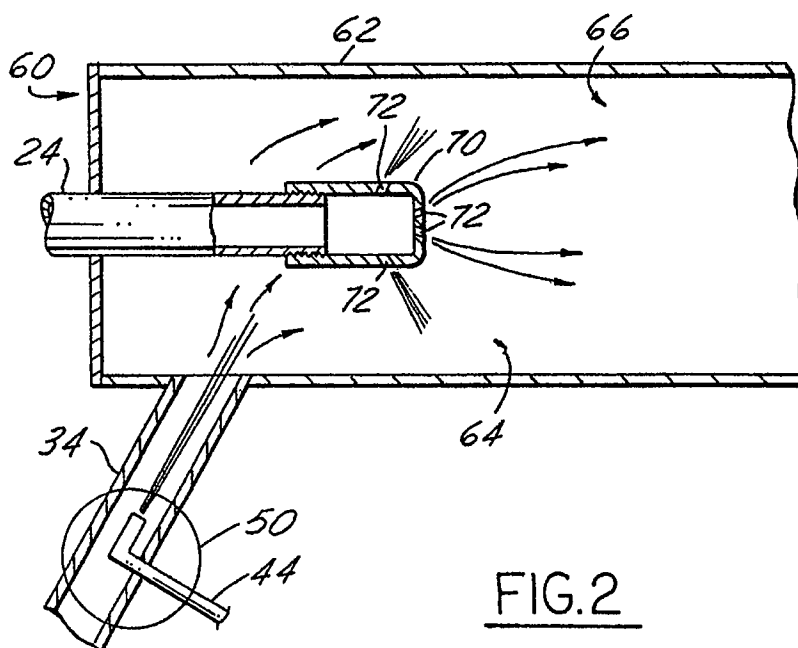
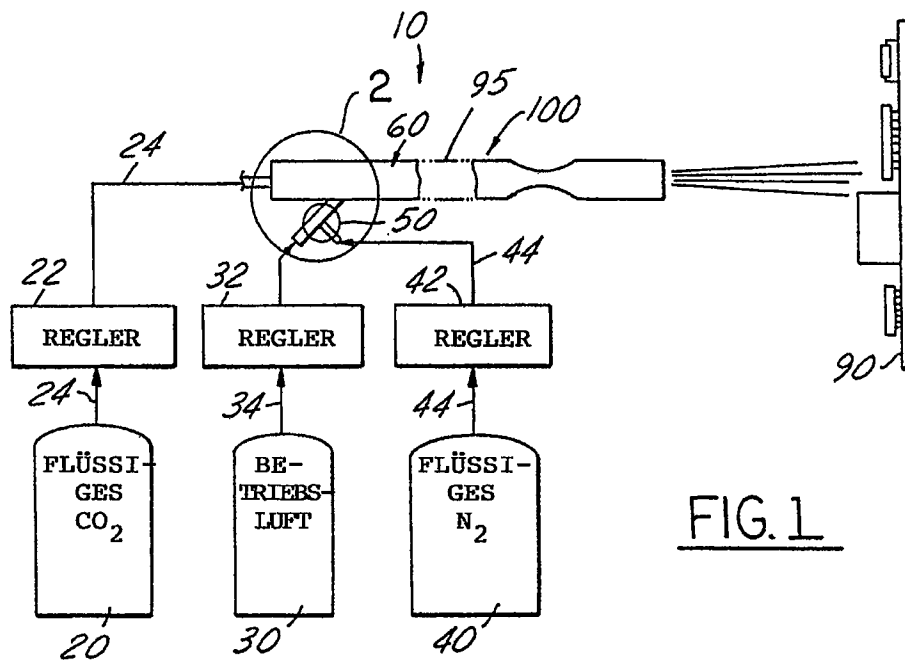
45

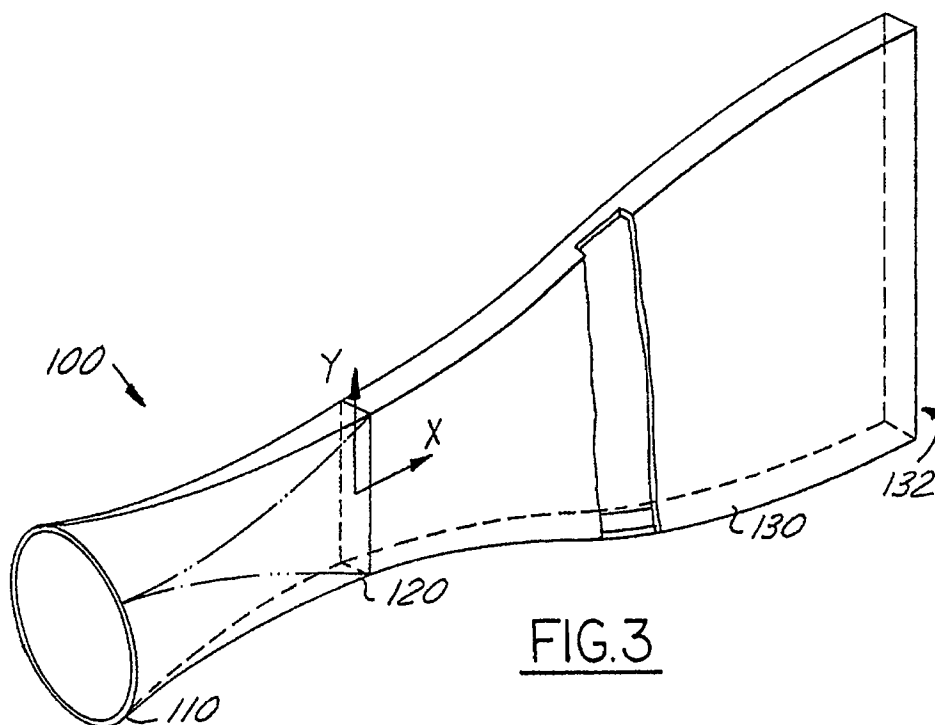
50

55

60

65





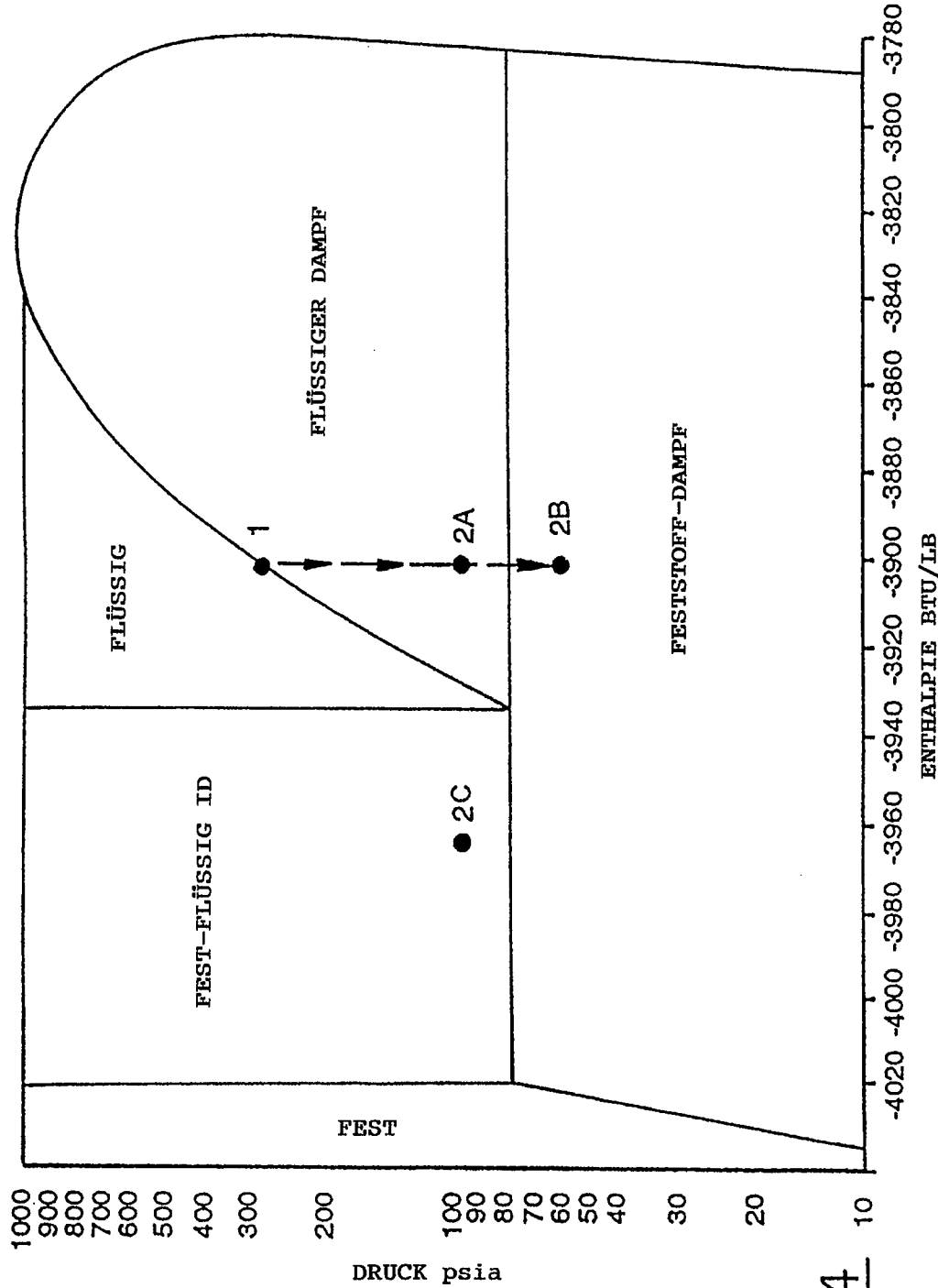
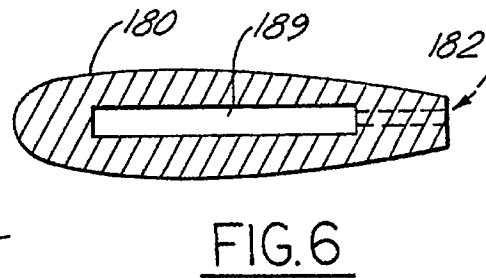
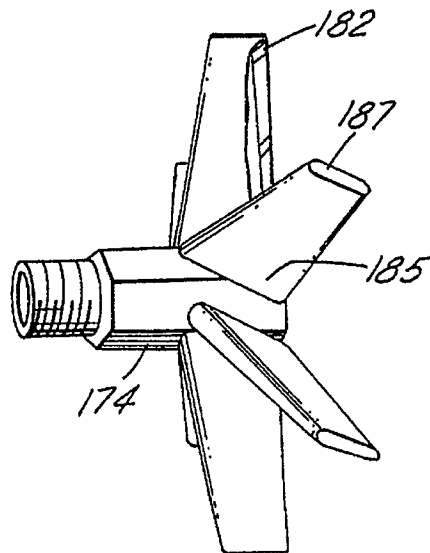
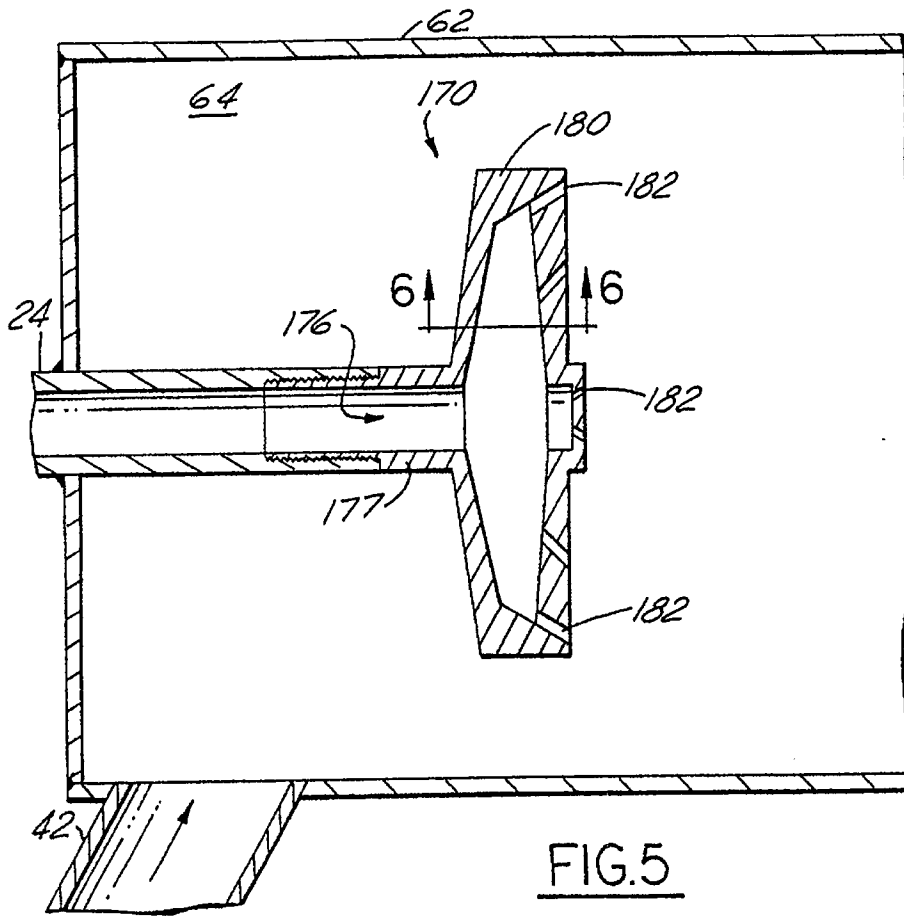


FIG.4



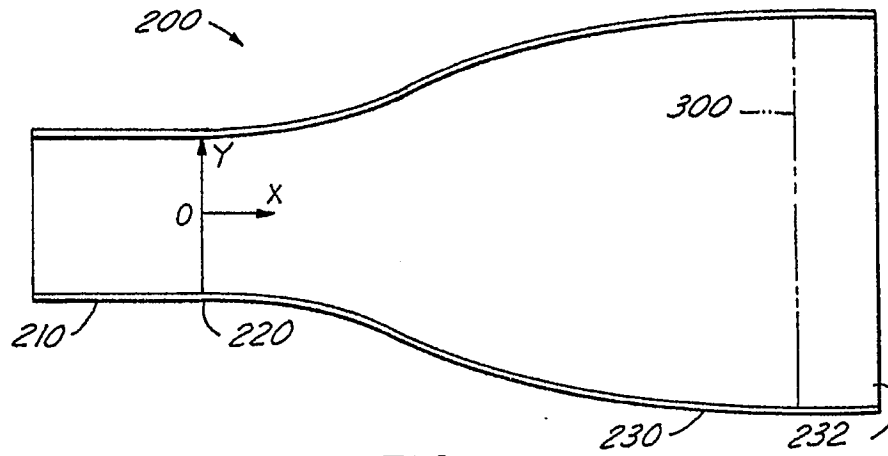


FIG. 8

DRUCKSCHWANKUNGEN DURCH DÜSE
 $P_{ti} = 94,5 \text{ psia}$

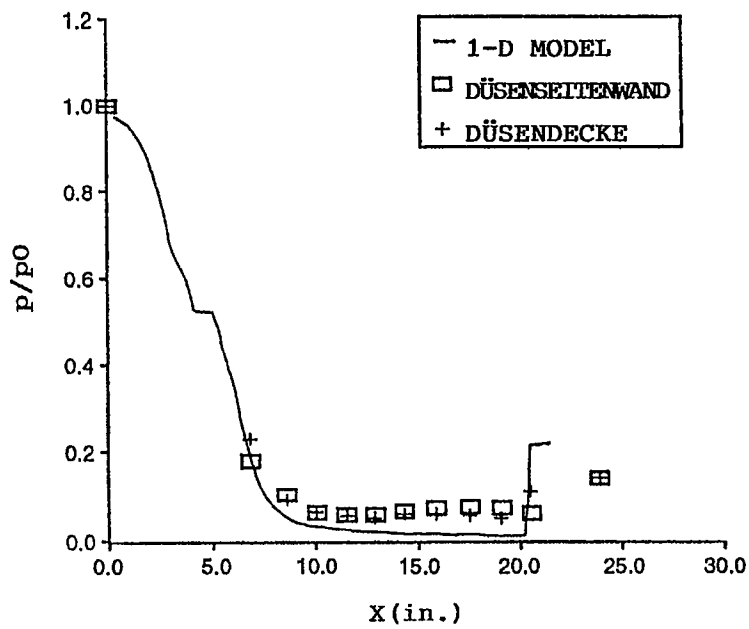


FIG. 9

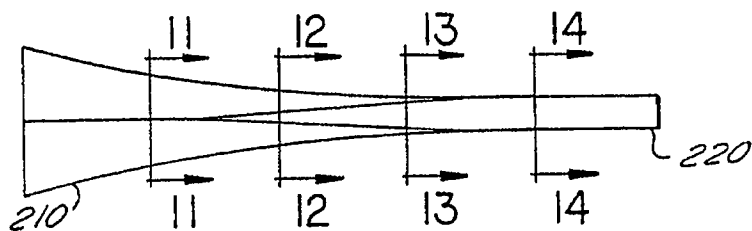


FIG.10

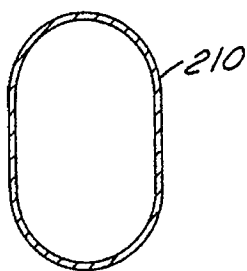


FIG.11

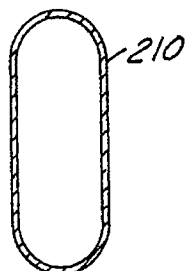


FIG.12

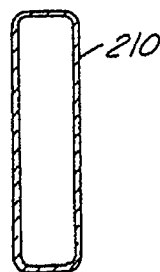


FIG.13

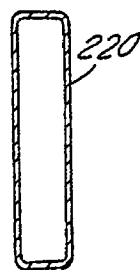


FIG.14